

УДК 539.53:620.178.15

О. Каток, канд. техн. наук; О. Дроздов, канд. техн. наук

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЦЕДУРИ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОСТІ І МІЦНОСТІ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ІНСТРУМЕНТОВАНОГО ІНДЕНТУВАННЯ

Резюме. Для нормування процедури визначення характеристик твердості і міцності сталей методом інструментованого індентування в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України розроблено проект стандарту Національної академії наук України. Отримано позитивні результати щодо використання цього стандарту при визначенні стану металу зварного з'єднання №111 «гарячого» колектора з корпусом парогенератора та стінки труби (сталь 17Г1С-У) газопроводу.

Ключові слова: нормативний документ, метод інструментованого індентування, характеристики міцності, границя міцності, границя плинності, твердість за Брінеллем.

О. Katok, O. Drozdov

DEVELOPMENT OF THE PROCEDURE FOR DETERMINING THE HARDNESS AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF STEELS BY THE INSTRUMENTED INDENTATION METHOD

Summary. The draft standard for nondestructive testing of the material condition of critical structural elements during their manufacture, operation and repair was prepared by the National Academy of Sciences (NAS) of Ukraine. This standard document was developed basing on the experimental investigations performed at the G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength under the NAS of Ukraine. A test method for instrumented indentation in the macro-range of indentation forces and procedures for converting Brinell hardness and strength of steels from instrumented indentation curves has been established. The deviation of the hardness values, estimated according to this standard from tensile testing results, does not exceed 10%, and the deviation of the Brinell hardness values, estimated according to this standard from the data, obtained by the Brinell hardness test method, does not exceed 5%.

The developed standard has been used in the evaluation of the metal condition of critical equipment after its service life. The results of determining the distribution of the strength and hardness characteristics for the metal of welded joint No. 111 of the "hot" collector to the steam generator nozzle and the gas pipe wall, determined by the instrumented indentation method, are presented as an example.

Key words: standard document, instrumented indentation method, hardness characteristics, ultimate strength, yield strength, Brinell hardness.

Вступ. Одним із перспективних методів неруйнівного контролю поточного стану конструкційних матеріалів технічних виробів є метод інструментованого індентування. Використання цього методу в галузях народного господарства України обмежене відсутністю діючих нормативних документів на метод інструментованого індентування і методик розрахунку механічних характеристик матеріалів за діаграмами індентування. На сьогодні є актуальним розроблення нормативного документа для нормування процедури визначення методом інструментованого індентування механічних характеристик матеріалів.

Метою даної роботи є ознайомлення учасників конференції з проектом стандарту національної академії наук України, в якому наведені вимоги до методичної та експериментальної баз визначення твердості за Брінеллем та характеристик міцності сталей методом інструментованого індентування.

Метод інструментованого індентування, заснований на безперервній реєстрації процесу локального деформування матеріалу індентором. Результати індентування

подаються у формі діаграм у координатах «випробувальне навантаження F – глибина індентування h » (рисунок 1). Отримані діаграми індентування використовують для визначення механічних характеристик матеріалів [1]. До переваг методу, порівняно з традиційними вимірюваннями твердості, відносяться: можливість вивчення самого процесу безперервного локального деформування матеріалу індентором, швидке проведення випробувань за рахунок автоматизації самого процесу, а також відсутність впливу суб'єктивного фактора під час вимірювання відбитків втискування.

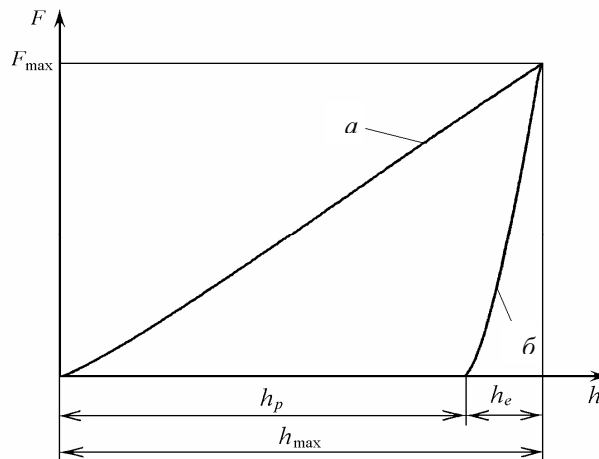


Рисунок 1. Схематичне представлення методу випробування, де а – прикладення випробувального навантаження; б – зняття випробувального навантаження

Figure 1. Schematic appearance of the testing method, where a – application of the testing loading; b – without testing loading

В Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України проведено комплекс досліджень, направлених на розроблення обладнання для проведення випробувань за методом інструментованого індентування в лабораторних та промислових умовах в макродіпазоні зусиль індентування [2, 3], а також на удосконалення й розроблення нових методик визначення характеристик міцності за результатами таких випробувань [4 – 8]. Досягнуті результати покладено в основу створеного проекту стандарту Національної академії наук України «Матеріали металеві. Метод інструментованого індентування для визначення характеристик твердості і міцності сталей. Метод випробування».

Основні положення створеного стандарту відповідають вимогам першої та другої частин міжнародного нормативного стандарту ISO 14577-1:2003 “Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters” і ДСТУ 1.2:2003 «Правила розроблення національних нормативних документів».

Запропонований нормативний документ встановлює метод випробування на інструментоване індентування в макродіпазоні навантажень від 2 до 10000 Н та методики розрахунку твердості за Брінеллем і міцності сталей за діаграмами інструментованого індентування. Слід зазначити, що визначення характеристик міцності й твердості матеріалів методом інструментованого індентування є непрямым оцінюванням. Тому відхилення величин характеристик міцності, що визначаються згідно з цим стандартом, від величин характеристик міцності, визначених за результатами випробувань на розтяг, не повинно перевищувати 10%. Відхилення значень твердості за Брінеллем, що визначаються згідно з цим стандартом, від даних, отриманих за ГОСТом 9012, не повинно перевищувати 5%.

Для визначення границі міцності й твердості металів використано методики, які розроблено в Інституті [6]. На відміну від існуючих методик, механічні властивості конструкційних сталей згідно з наведеною в стандарті методикою визначаються за коефіцієнтом пропорційності пластичного інденування. Коефіцієнт пропорційності пластичного інденування дорівнює тангенсу кута нахилу γ діаграми інденування в координатах «максимальне випробувальне навантаження циклу навантаження F_{max} – залишкова глибина інденування h_{plast} після зняття випробувального навантаження цього циклу» (рис. 2). При такому підході визначення механічних властивостей металів не залежить від пружної деформації вузла вимірювання глибини втискування індентора. Результати експериментальних досліджень, виконаних в Інституті, свідчать, що у широкому діапазоні зміни характеристик міцності (400 ... 1200 МПа) конструкційних сталей (вуглецеві 20 і 45, трубна 17Г1С та теплостійкі 15Х2НМФА, 10ГН2МФА) відхилення величин границі міцності, які визначені за наведеною в стандарті методикою, від результатів випробувань на розтяг не перевищує 6, 5%.

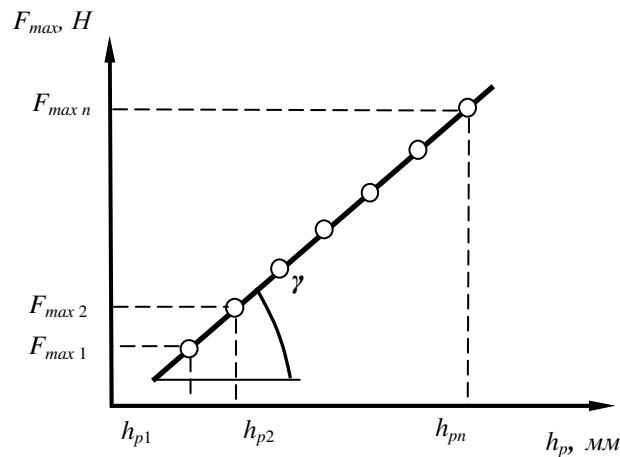


Рисунок 2. Схематичне представлення діаграми інструментованого інденування в координатах «максимальне випробувальне навантаження циклу навантаження: F_{max} – залишкова глибина інденування h_{plast} після зняття випробувального навантаження цього циклу», де позначення: $F_{max i}$ – максимальне випробувальне навантаження i -го циклу, Н; h_{pi} – залишкова глибина інденування після зняття максимального випробувального навантаження $F_{max i}$ i -го циклу мм; γ – кут нахилу діаграми інструментованого інденування в координатах « F_{max} – h_p » до осі абсцис

Figure 2. Schematic appearance of the instrumented indentation diagram in the coordinates “maximal testing loading of the loading cycle: F_{max} – residual indentation depth; h_{plast} after unloading of the cycle”, where the signs: $F_{max i}$ – maximal testing loading of i -cycle, Н; h_{pi} – residual depth of indentation after maximal unloading $F_{max i}$ i -cycle mm; γ – angle of deflection of the instrumented indentation in the coordinates “ F_{max} – h_p ” till the abscissa axis

Визначення умовної границі плинності методом інструментованого інденування ґрунтується на кореляційній залежності між границею плинності, визначеною з випробування на розтяг (ГОСТ 1497), та коефіцієнтом пластичності A . Коефіцієнт A визначають з рівняння (1), що описує діаграму інденування в координатах «напруження у відбитку – деформація» [9].

$$\frac{F}{d^2} = A \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^m, \quad (1)$$

де m – параметр, який визначає здатність матеріалу до зміцнення; A – коефіцієнт пластичності; F/d^2 – напруження у відбитка; d/D – деформація

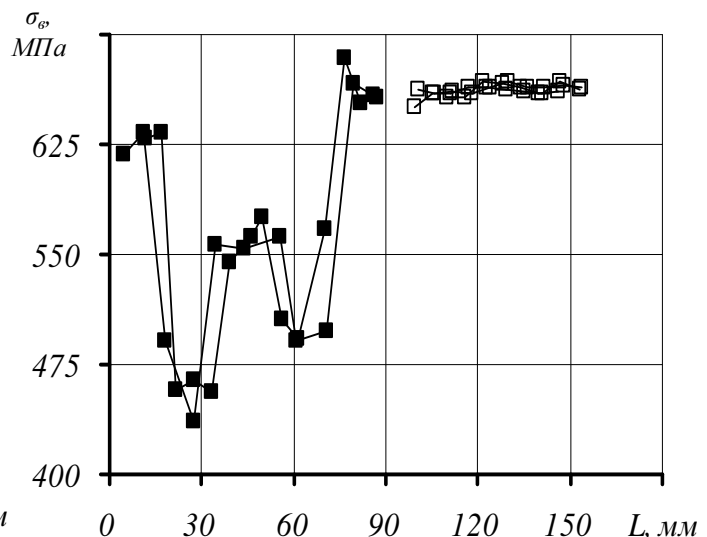
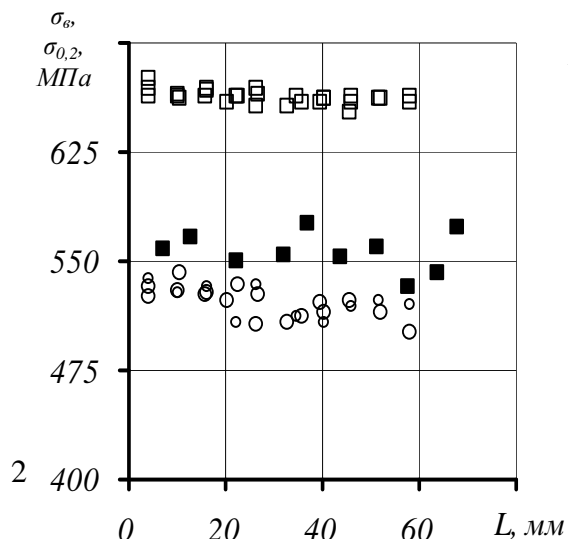
В стандарті наведено вимоги до експериментального обладнання для випробувань металів за методом інструментованого індентування в лабораторних та промислових умовах при різноманітних режимах статичного і циклічного навантаження в макродіапазоні зусиль індентування. Особлива увага приділяється піддатливості експериментального обладнання, оскільки неврахування пружної деформації призводить до завищення значень вимірюваної глибини індентування, які визначаються піддатливістю випробувальної машини. Це, в свою чергу, призводить до виникнення додаткової похибки при визначенні механічних характеристик металу за результатами індентування.

Регламентовано методику підготовки поверхні випробування зразка або конструктивного елемента до дослідження, а також підготовку експериментального обладнання. Описано методику випробувань металів методом інструментованого індентування. Зокрема, наведено процедуру визначення моменту дотику індентором поверхні зразка (момент дотику поверхні зразка визначається за величиною нижньої границі макродіапазону зусилля індентування) і установлено, що швидкість індентора при цьому повинна бути не більша 0,12 мм/хв.

Приведено вимоги до товщини зразка або конструктивного елемента і відстані між центрами двох суміжних відбитків та відстані між центром відбитка і краєм зразка.

Стандарт призначений, в першу чергу, для організацій, які мають здійснювати оцінювання характеристик міцності і твердості за Брінеллем методом інструментованого індентування. Його можливо використовувати для неруйнівного контролю стану матеріалу відповідальних конструкцій у процесі їх виготовлення, експлуатації та ремонту в тепловій і ядерній енергетиці, нафтогазовій промисловості.

Розроблений нормативний документ було використано для оцінювання стану металу відповідального обладнання після експлуатаційного напрацювання. Зокрема, вперше методом інструментованого індентування визначено розподіл характеристик міцності й твердості металу по висоті й товщині вузла зварного з'єднання №111 «гарячого» колектора з корпусом парогенератора [7]. Показано, що по товщині основного металу границя міцності змінюється не більше ніж на 1,5%, тоді як по висоті (поперек зварного з'єднання) вона має складний немонотонний характер, а зміна границі міцності металу сягає 35%. Визначено механічні характеристики металу стінки труби (сталь 17Г1С-У) газопроводу вздовж поперечного перерізу [8]. Результати, отримані методом інструментованого індентування, підтверджені даними випробувань на одновісний розтяг.



а

б

Рисунок 3. Розподіл границі міцності (■, □) і границі текучості (○) теплостійкої сталі 10ГН2МФА по товщині (а) та висоті (б) вузла зварного з'єднання «гарячого» колектора з патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР-1000 після експлуатаційного напрацювання: ■ – зона зварного з'єднання (зварний шов №111); □, ○ – частина патрубка парогенератора ДУ 1200

Figure 3. Distribution of the ultimate strength and the yield strength of the heat-resistant steel 10ГН2МФА along the thickness (a) and height (b) of the welded joint of the “hot” collector of the steam generator nozzle AEC after its service life: ■ – welded joint area (welded joint No111; □, ○ – part of the steam generator nozzle ДУ 1200

Висновок. Таким чином, у межах Національної академії наук України створено єдину нормативну базу, узгоджену з європейськими вимогами стандарту, щодо визначення характеристик міцності й твердості за Брінеллем методом інструментованого індентування. Отримано позитивні результати щодо використання нормативного документа для оцінювання стану металу зварного з'єднання №111 «гарячого» колектора з корпусом парогенератора та стінки труби (сталь 17Г1С-У) газопроводу.

Conclusion. Thus, a common regulatory framework for determining the strength and Brinell hardness characteristics by the instrumented indentation method that meets the European standard requirements has been established within the National Academy of Sciences of Ukraine. The positive results have been obtained concerning the use of this standard document for estimation of the condition of the welded joint (WJ-111) and metal of the “hot” collector of the steam generator nozzle and the pipe wall (steel 17G1S-U) of the gas pipeline.

Список використаної літератури

1. ISO 14577-1:2002 – ISO 14577-3:2002. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.
2. Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования [Текст] / В.В. Харченко, Н.П. Рудницкий, О.А. Каток, А.Н. Неговский, А.В. Дроздов, В.В. Кутняк // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2007. – Вып. 28. – С. 140 – 147.
3. Переносний прилад для визначення характеристик міцності металів методом інструментованого ідентування [Текст] / В.В. Харченко, О.А. Каток, О.В. Дроздов і ін. // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2009. – Вип. 32. – С. 162 – 168.
4. Анализ методик определения механических свойств сталей по результатам непрерывного индентирования [Текст] / О.А. Каток, В.В. Харченко, А.В. Дроздов и др. // Тез. докл. Межд. конф. «Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС» (Киев, 20 – 22 мая 2009 г.). – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2009. – С. 66 – 67.
5. Определение механических свойств сталей методом непрерывного индентирования [Текст] / О.А. Каток, В.В. Харченко, А.В. Дроздов, О.В. Панасенко // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2009. – Вып. 31. – С. 208 – 213.
6. Харченко, В.В. Оцінка характеристик міцності сталей методом інструментованого індентування [Текст] / В.В. Харченко, О.А. Каток, В.Е. Філатов // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи їх діагностування і прогнозування: Міжнар. науково-технічна конференція, 21 – 24 вересня 2009 р.: праці конференції / Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя. – Тернопіль, 2009. – С. 64 – 69.
7. Дослідження механічних характеристик зварного з'єднання парогенератора методом інструментованого індентування [Текст] / В.В. Харченко, О.А. Каток, О.В. Панасенко, М.П. Рудницкий, А.В. Бажуков, П.Є. Мельник / В кн.: «Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС» (Ресурс – 2012), Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. (Киев, 2 – 5 октября 2012 г.). – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2010. – С. 234 – 235.
8. Експериментальне оцінювання механічних властивостей металу трубопроводу зі сталі 17Г1С-У після тривалої експлуатації [Текст] / О. Гопкало, П. Юхимець, О. Бернацький, О. Гопкало,

- О. Каток, Р. Дмитриенко // Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя. – 2012. – № 2 (66). – С. 40 – 52.
9. Haggag, F. M. Innovative SSM Technology Determines Structural Integrity of Metallic Structures: Example Applications for Pressure Vessels and Oil and Gas Pipelines. // International Journal of Pure and Applied Physics – 2007. № 1. – P 91 – 108.

Отримано 12.08.2013